

基于抗震性能目标的超限高层建筑结构抗震分析

林树枝^{1,2} 许泽瑶²

(1. 厦门市建设与管理局 福建厦门 361003; 2. 厦门大学建筑与土木工程学院 福建厦门 361005)

摘 要: 超限高层建筑是指超过国家现行规范规定的适用高度或结构类型、及体型特别不规则的高层建筑。本文针对不同类型的超限高层建筑提出了结构的抗震设计原则和设计要点,以泉州浦西万达广场超高层住宅和江西南昌绿地中央广场为例,讨论了高度超限的复杂高层建筑。利用弹塑性时程分析的结果,对工程的结构抗震性能进行评估,并就结构的受力特性提出了抗震加强措施,本研究可为超限高层结构的抗震设计提供参考。

关键词: 超限高层 抗震性能目标 弹塑性时程分析 加强措施

中图分类号: TU352.1⁺¹

文献标识码: B

文章编号: 1004-6135(2011)10-0050-05

Performance—Based Structural Seismic Analysis of High—rise Buildings

Lin Shuzhi^{1,2} Xu Zeyao¹

(1. Xiamen Construction And Administration Bureau Xiamen 361003;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University Xiamen 361005)

Abstract: Super high—rise Building is the tall building which is out of the current codes in height or structural type or special irregular shape. This paper proposes the principle and key points of seismic design with different type, and takes Quanzhou Puxi Wangda Square and Jiangxi Nanchang Greenland Central Plaza as examples to analysis the complex high—rise building. The structural dynamic performance is assessed with the elastic—plastic time—history analysis. The anti—seismic measures according to mechanical characteristics will give the designer some reference.

Keywords: High—rise buildings Performance—based seismic goal Elastic—plastic time—history analysis Anti—seismic measures

1 引言

近年来,由于经济快速发展和建设需求,全国各地相继出现了各种形式的高层、超高层、及结构体系复杂的超限高层建筑,如何评估和保证超限高层建筑在地震作用下的可靠性变得尤为重要。2010 新颁布的《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》^[1],重新划定了超限高层建筑的范围;提出了应根据结构超限情况、震后损失、修复难易程度和大震不倒等原则,确定抗震性能目标;技术要点还针对抗震设计做了具体的规定,明确了抗震专项审查内容。本文针对不同类型的超限高层建筑提出了结构的抗震设计原则和设计要点,对不同烈度区的超限高层建筑设定了不同的抗震设防目标,利用弹塑性时程分析的结果,对结构抗震性能进行评估,并提出相应的加强措施。

2 结构抗震性能目标

建筑抗震性能目标指某一设定地震地面运动(如在给定年限内超越概率 63%、10% 和 2%—3% 的小震、中震和大震)下建筑的预期性能水准。

2.1 结构的抗震性能水准

根据结构在不同水准地震下的损伤程度、破坏情况和是否

可继续使用等情况设定为以下 5 个性能水准^[2](如图 1 所示):

1a,结构在地震后完好、无损伤,一般不需修理即可使用;1b,结构基本完好,仅有个别构件轻微裂缝,一般不需修理或稍加修理即可继续使用;2,地震后结构的薄弱部位和重要部位的构件完好、无损伤,部分延性构件出现明显裂缝,修理后仍可使用;3,地震后结构的薄弱部位和重要部位的构件轻微损坏,出现轻微裂缝,部分延性构件发生中等的损坏,出现明显裂缝,进入屈服阶段,需要修理并采取一些安全措施可继续使用;4,结构在地震下发生中等程度的破坏,多数构件轻微损坏,部分构件中等损坏,进入屈服,有明显裂缝,经过修理、适当加固后才可继续使用;5,结构在地震下放发生明显损坏,多数构件中等损坏,进入屈服,有明显的裂缝,部分构件严重损坏,但整个结构不倒塌,也不发生局部倒塌,人员会受到伤害,但不危及生命安全。

2.2 结构的抗震性能目标

对于超限高层建筑,可以根据具体的设防烈度、场地条件、房屋高度、不规则的部位和程度,以及业主的经济实力选择结构在三个水准地震下的性能水准,从而实现相应的结构设计,如表 1 所示:

表 1 性能目标选定方案

抗震水准	结构性能水准					
	1a	1b	2	3	4	5
第一(小震)	A、B、C、D、E					
第二(中震)	A	B	C	D	E	
第三(大震)		A	B	C	D	E

性能目标 A,小震和中震均满足性能水准 1a 的要求,大震



作者简介: 林树枝,男,1963 年 5 月出生,博士,教授,博士生导师。长期从事高层建筑结构设计、结构抗震、结构优化设计以及地基基础方面的理论与工程实践。

收稿日期: 2011-06-27

下满足性能水准 1b 的要求,结构整体完好,其高度和不规则性一般不需要专门限制;性能目标 B,小震下满足性能水准 1a,中震满足性能水准 1b 的要求,大震满足性能水准 2 的要求,整体结构基本完好,其高度和规则性一般也不需要专门限制;性能目标 C,小震下满足性能水准 1a 的要求,中震下满足性能水准 2 的要求,大震下满足性能水准 3 的要求,部分结构构件损坏,其高度不需要专门限制,重要部位的不规则性限制可比现行标准的要求放宽;性能目标 D,小震下满足性能水准 1a 的要求,中震下满足性能水准 3 的要求,大震下满足性能水准 4 的要求,结构中等破坏,其高度可适当超过现行《高层建筑混凝土结构技术规范》B 级的规定,某些不规则性限制可适当放宽;性能目标 E,小震下满足性能水准 1a 的要求,中震下满足性能水准 4 的要求,大震下满足性能水准 5 的要求,结构的损坏不危及生命安全,其高度一般不宜超过《高层建筑混凝土结构技术规范》B 级的规定,规则性限制也不宜放宽^[2]。

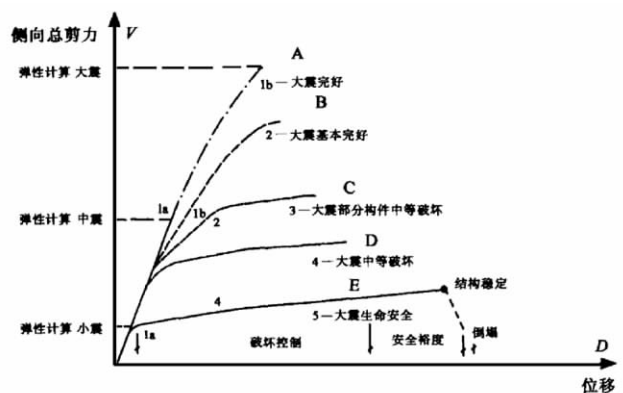


图 1 抗震性能目标和性能水准示意图

3 超限高层建筑抗震设计原则及要点

3.1 设计原则

要满足抗震设防目标大震不倒、中震可修、小震不坏三个水准的要求,按抗震设计两阶段进行设计,多遇地震下采用弹性反应谱法,罕遇地震下进行抗倒塌弹塑性变形验算。用多遇地震下弹性动力时程分析校核弹性反应谱法结果,粗略判断结构薄弱层。用 Pushover 弹塑性静力时程分析,判定结构构件塑性较出现的顺序和分布,以及不同受力阶段变形发展情况,并获得弹塑性底部剪力(倾覆力矩)、顶点位移曲线、弹塑性楼层剪力、层间位移曲线等。高度超限(特别是超 B 级高度)的高层建筑,还应补充进行弹塑性动力时程分析。

3.2 设计要点:

(1)对于平面规则性超限(如:楼板凹凸不规则,楼板之间连接较弱、局部不连续、板内开大洞,楼层最大弹性水平位移大于该楼层弹性水平位移平均值的 1.2 倍、结构扭转效应明显等),设计要点为:

1)对于凹凸不规则和楼板局部不连续的情况,应采取符合楼板平面内实际刚度变化的弹性楼盖模型,或按分块刚性楼板+局部弹性板进行计算,并应考虑扭转藕联效应。

2)对楼板中应力集中部位(凸凹部位及洞口四角)和弱连

接的楼板,应采取加大楼板厚度,采取双层双向配筋,配置集中配筋的边梁,配置 45°斜向钢筋等方法加强,凹口部位可增设部分拉梁或拉板。

3)当平面过于不规则、或楼板联系过弱,或当建筑物超长时(主体结构长度大于 60m),可通过设置变形缝将结构切成若干个子结构。对结构扭转效应明显的超限高层建筑,应尽量使抗侧力构件在平面布置中对称、均匀,避免过大偏心,并应尽量加大外围竖向构件的抗侧刚度和强度。

(2)对于竖向规则性超限(如:立面收进,连体建筑,立面开大洞,转换层结构,大底盘多塔楼等),设计要点为:

1)立面收进引起的超限,应确保结构的层受剪承载力不小于相邻上一层楼的 80%,并使结构扭转效应控制在合理范围内。收进部位竖向构件及楼板宜加强。立面收进若造成偏心,底部结构会因扭转而产生较大内力,因此,底部结构周边构件的配筋应加强。在可能的情况下,宜采用台阶形多次内收的立面。

结构分析的重点应是检查结构的位移有无突变,结构刚度沿高度分布有无突变,结构的扭转效应是否能控制在合理的范围内。

2)连体建筑连接部位及其周边应采用弹性板计算,连接体与主体宜采用弱连接(如:铰接),其重量应尽可能减轻,并应优先采用钢结构。连接体及与主体相邻的结构构件的抗震等级应提高一级采用。

3)立面开大洞着重加强洞口四角及洞边周边,避免在小震时洞角开裂。

4)对于悬挑结构,设计时应考虑竖向地震作用。悬挑结构的上部结构质量较大,扭转惯性矩也大,若存在质量偏心,会造成严重的扭转效应,设计时应予避免。

5)带转换层结构,尽可能多布置成上下主体竖向结构连续贯通,核心筒宜尽量上下贯通,强化下部主体结构刚度,弱化上部主体结构刚度,采取措施控制转换层上下等效刚度比,增大框支柱承担地震剪力的比例,提高框支层的延性及抗震能力。可通过减少上部各层刚度(如部分墙肢改用短肢墙),降低转换层上下等效刚度比。转换层越高,高振型影响越大,转换层上下层间位移角及内力突变也越明显,因此,应严格控制转换层的设置高度。

6)大底盘多塔楼,在设计时应考虑提高底盘的承载力,以防止结构在底部首先屈服。连接各塔楼的裙房屋面刚度宜加大,以保证底部裙房能带动上部塔楼共同振动。但底部加强会导致薄弱层上移,使上部结构的位移增大,因此应把握好提高底盘承载力的加强措施。对塔楼的薄弱部位进行加强设计,该层柱箍筋宜全高加密、箍筋直径加大,剪力墙的水平钢筋也适当加强^[3-5]。

(3)对于高度和高宽比超限,设计要点为:

1)尽可能采用适用高度较高的结构类型。例如钢筋混凝土框架结构房屋高度超限时,可改用框架-剪力墙结构。

- 2)应验算结构整体抗倾覆稳定性,要有足够的埋置深度,验算桩基在侧向力最不利组合情况下桩身是否会出现拉力或过大的压力。
- 3)要控制顶点位移及层间侧移。当侧移满足不了要求时,可考虑利用建筑设备层和避难层空间,沿竖向设置若干层伸臂桁架或腰桁架。应考虑重力二阶效应,当结构高度大于 150m 时,应进行风荷载作用下的舒适度验算。对于设置加强层结构,须注意加强层上、下外围框架柱的强度和延性设计,加强层附近的核心筒墙肢应按底部加强层部位的要求设计;“有限刚度”加强层的水平伸臂构件和周边环带宜采用桁架形式,加强层上下的楼板宜加厚,配筋设计中要考虑楼板的翘曲影响,板宜采用双层双向构造配筋。
- 4)适当降低底部竖向构件在最不利荷载组合下的轴压比,并加强配筋。当轴压比满足不了要求、且构件断面再增大有困难时,可采用钢或其他组合构件与钢筋混凝土共同组成的结构。
- 5)对超高很多或结构体系特别复杂、结构类型特殊的工程,当没有可借鉴的设计依据时,应选择整体结构模型,结构构件,关键节点模型进行必要的抗震性能试验研究。
- 针对不同超限类型结构体系的抗震加强措施如表 2 所示。

表 2 抗震加强措施

结构体系	超限类型	抗震加强措施
框架结构	平面、竖向不规则	提高框架柱等级,控制轴压比小于 0.85,加大柱配筋,楼、电梯间、局部楼板适当加厚,采用双层双向配筋。
框架—剪力墙结构	平面、竖向不规则	加强水平构件刚度,减少扭转效应,控制框架柱、剪力墙轴压比;加强部分楼板刚度和底部加强区刚度。
框架—筒体结构	高度超限,平面、竖向不规则	底部加强区竖向构件中震抗剪弹性、抗弯不屈服。提高框架—核心筒强度储备和延性,适当增加底部侧移刚度,控制轴压比,适当提高框架柱抗震等级。
剪力墙结构	高度超限,高宽比超限	底部加强区竖向构件中震抗剪弹性、抗弯不屈服。抗侧力构件均匀对称布置,减少扭转,加强薄弱部位的楼板。
钢框架—筒体结构	高度超限,平面、竖向不规则	底部加强区竖向构件中震抗剪弹性、抗弯不屈服。提高筒体延性,加强角部型钢柱,设置加强层时,外伸桁架应与抗侧力筒体刚接且宜伸入并贯通抗侧力筒体。
型钢砼柱—筒体结构	高度超限,平面、竖向不规则	底部加强区竖向构件中震抗剪弹性、抗弯不屈服。增强核心筒底部加强区的延性,提高结构的整体抗侧、抗扭刚度,提高第二道防线的抗震能力。

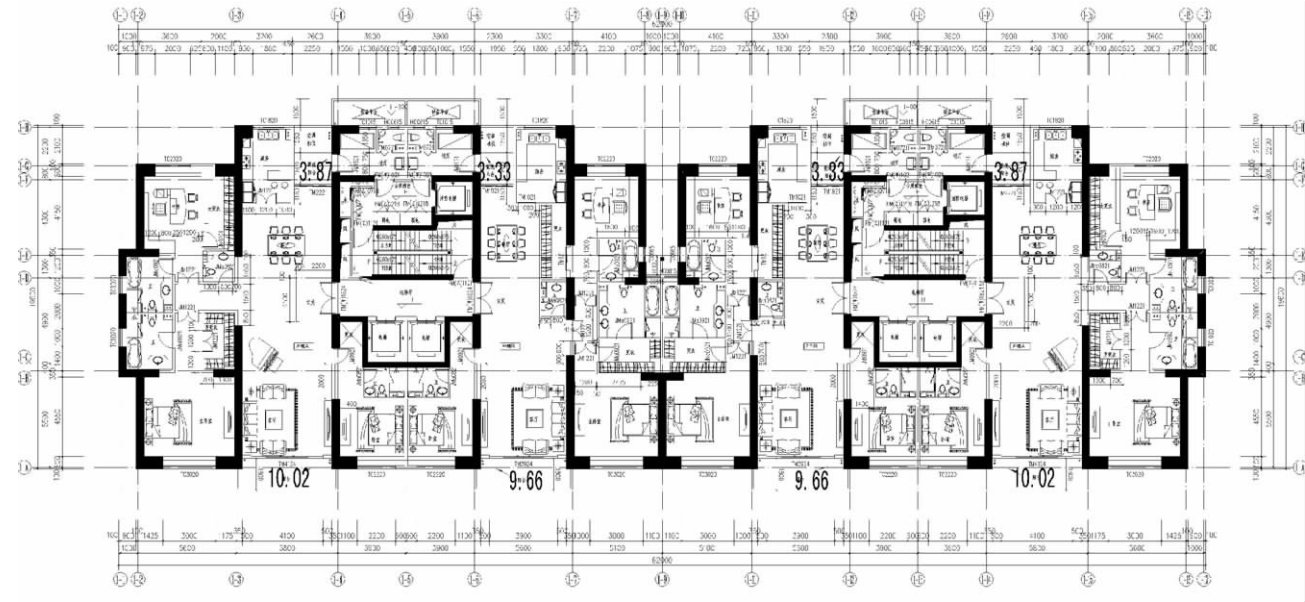


图 2 标准层平面图

4 工程设计实例

4.1 泉州浦西万达广场超高层住宅

4.1.1 工程简介

本工程由福建省建筑设计研究院设计^[6],该建筑高度 150m,地下 3 层,地上 47 层,1—2 层为商业裙房,3—47 层为住宅。采用现浇钢筋混凝土剪力墙结构,楼盖为现浇钢筋砼梁板体系。南区地下一层局部设有夹层,夹层高度 4.25 m。基础埋深约 15.0m。该场地地震基本烈度为 7 度,设计地震分组为第二组,场地类别 III 类,基本风压为 0.7kPa。

4.1.2 超限情况

本工程主楼大层面标高 150m,超出《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)第 6.1.1 条规定的适用高度 120m。主楼高宽比为 7.5,超出《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002)第 4.2.3 条规定最大高宽比 6。

4.1.3 抗震性能指标选取

按规范要求,按“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防原则,针对本工程特点,根据不同的结构部位及重要程度,采取了不同的抗震性能目标:

表 3 抗震性能指标

	多遇地震	中震	罕遇地震
性能目标	无损坏	允许一定程度损坏, 维修后可以使用	结构损坏但是不倒塌
层间位移角限值	1/1000	—	1/100
核心筒底部加强区及上延一层墙体	弹性	抗剪弹性, 抗弯不屈服	允许局部抗弯屈服, 不允许斜截面剪切脆性破坏, 控制剪压比 <0.15
核心筒其它层墙体	弹性	抗剪不屈服 允许抗弯部分屈服	允许部分屈服破坏
核心筒墙体连梁	弹性	抗剪不屈服 允许抗弯部分屈服	可出现塑性铰, 允许部分屈服
钢筋混凝土梁	弹性	允许梁端出现塑性铰	允许梁端出现塑性铰

4.1.4 结构分析与计算

该工程采用 SATWE 和 MIDAS 两种程序计算, 采用考虑弯扭耦联的振型分解反应谱法, 选用较多的振型以充分考虑高阶振型的影响, 并补充弹性时程分析计算, 采用性能目标设计的方法, 进行“中震不屈服”和“中震弹性”设计, 在底部加强区高度范围内, 竖向构件抗弯承载力按中震不屈服复核, 竖向构件的抗剪承载力按中震弹性复核。底部加强区剪力墙的水平钢筋配筋率不小于 0.3%, 调整抗侧力构件布置使之均匀对称; 减少质心与刚心之间的偏心, 减少结构的扭转效应, 控制结构的扭转位移比小于 1.2。对于楼板洞口较多的部位, 设计时加强该处梁、板合理刚度及配筋, 严格控制梁、板裂缝。

4.2 江西南昌绿地中央广场

4.2.1 工程简介

江西南昌绿地中央广场^[6], 由美国 SOM 公司设计和华东建筑设计研究院有限公司联合设计^[7], 分为南北两栋塔楼, 地上 60 层, 地下 3 层, 结构总高度 289m。设计使用年限 50 年, 丙类建筑, 建筑结构安全等级二级。地震基本烈度 6 度, 设计地震分组为第一组, 基本风压 0.45kPa。

该办公楼的上部结构采用了钢筋混凝土核心筒加周边型钢混凝土框架柱的钢-混凝土组合结构体系。该体系充分利

用了混凝土核心筒抗侧刚度大, 竖向承载力高的特点, 也结合了型钢混凝土柱截面尺寸小、抗震性能好、防火耐久性能佳的特点。低层采用型钢混凝土组合柱, 由混凝土内嵌钢板组成, 高层采用混凝土柱, 柱直径 800mm—1450mm(自上至下)。内筒和外框之间布置钢筋混凝土梁。在内核心筒周边布置较厚的剪力墙, 使结构具有较好的侧向及抗扭刚度, 剪力墙厚度 350mm—1100mm(自上至下)。合理的布置核心筒四角的设备用房, 保证了核心筒四角的完整性, 确保混凝土筒体具有良好的延性。外框架和内筒形成双重抗侧力体系, 具有良好的抗震性能。为了顺应大楼的几何形状, 周边柱自首层到顶层根据几何要求倾斜, 所产生的楼层面积各异。此时, 柱子容易由于偏心距过大, 产生失稳破坏。需要对对柱子进行加强设计, 提高柱子的承载力。

4.1.2 超限情况

办公楼总高度 250m, 超过了《高层混凝土结构设计技术规程》(JGJ3—2002)B 级高层建筑规定的 6 度抗震最大适用高度的 210m, 超过 40m, 超高 19.0%。设备夹层的楼板缺失(>30%), 楼板不连续。

4.1.3 结构分析与计算

针对上述的超限情况, 该结构选择的风洞荷载略大于

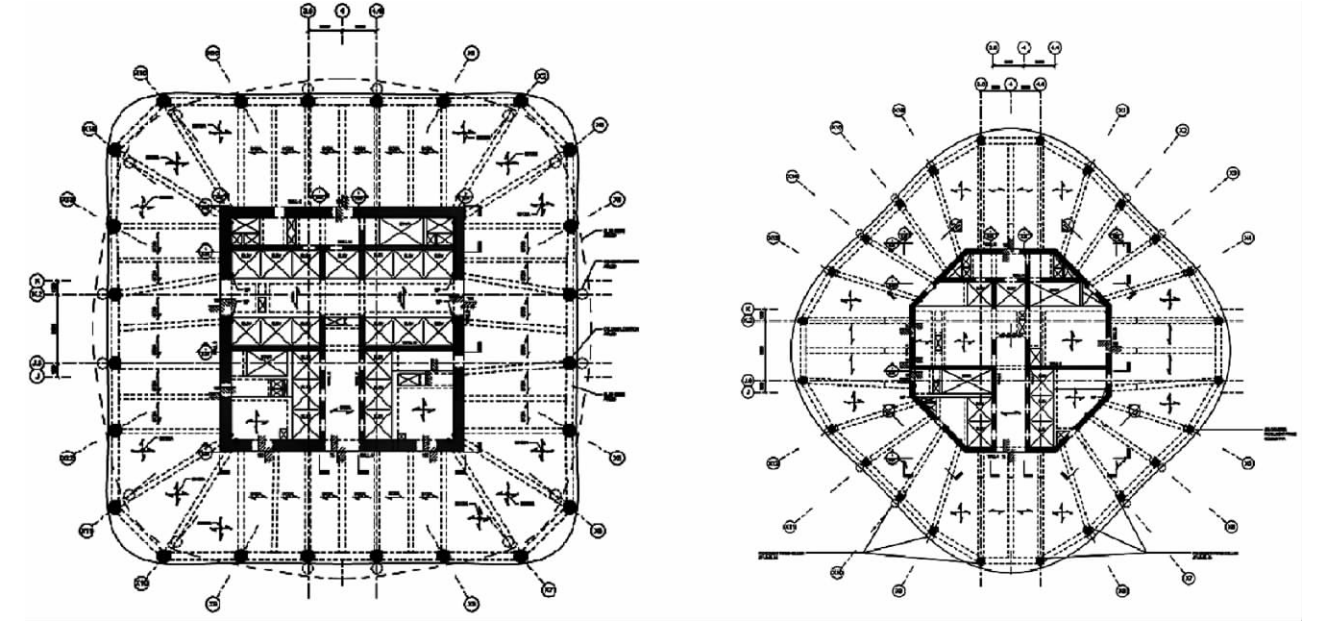


图 3 江西南昌绿地中央广场结构平面图

(5%)规范风荷载,选择的规范反应谱大于场地反应谱。适当提高抗震性能目标,并按时程分析和规范反应谱的包络值进行设计和计算。采用闭合的核心筒、有效的结构布置,提高结构的整体抗侧、抗扭刚度,满足规范对结构的层间侧移及结构扭转控制。为了增加核心筒剪力墙的延性,在核心筒底部加强区适当增设型钢,并且把约束边缘构件控制延伸到轴压比 0.25 处。结构周边框架体系采用钢管混凝土叠合柱,柱子的断面尺寸沿高度均匀变化,框架柱剪力取 $0.2Q_0$ 和 $1.5V_{fmax}$ 的较大值进行控制,提高第二道防线的抗侧能力。适当增加了剪力墙的厚度,减薄楼板厚度,重新校对了构件的刚度调整系数,使结构的剪重比满足 0.6% 的要求。在进行施工模拟分析时,考虑了筒体和柱的竖向变形差。在设备夹层处,采用了符合楼板平面内实际刚度变化的计算模型,风荷载直接以点荷载施加在两个受风面的柱子上。

该结构采用 PERFORM-3D 建立了结构的三维模型,设定以变形为基础或者以强度为基础的极限状态,采用了一条临时的时程曲线,对结构进行静力 Pushover 分析和罕遇地震下动力弹塑性时程分析,得到了建筑的非线性响应,并评估了建筑的抗震性能。

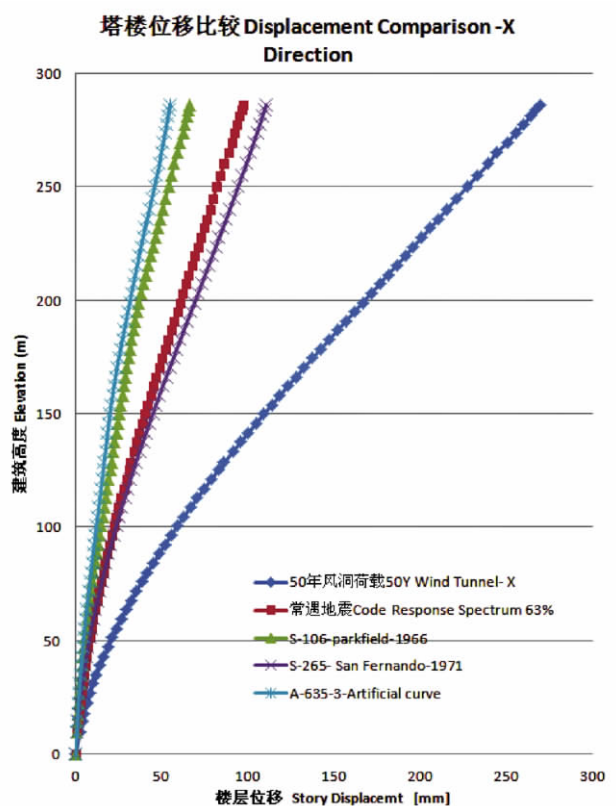


图4 塔楼位移比较

罕遇地震下,最大的层间位移比为 $0.0031 < 1/100$,满足规范要求。在 $t=13s$ 时,大部分连梁达到了屈服变形,进入塑性状态,但没有超过塑性极限。一些连梁超过了它的抗剪承载力(超过 5%~10%),这些连梁的设计将进行调整,以增加其抗剪强度。

剪力墙中应变未超过极限应变 0.002,墙中的钢筋拉应变

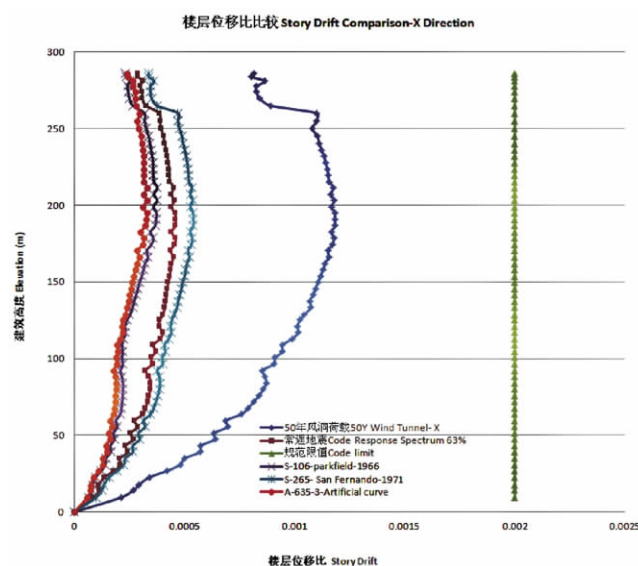


图5 楼层位移比较

小于屈服应变,剪应力基本小于抗剪强度。周边组合柱的最大压力为承载力的 40% 左右,没有出现拉力,从柱端转角与防止倒塌 CP 限值的比较可以看出,大部分柱子保持弹性,屈服的柱子将进行调整。周边框架梁在罕遇地震中有屈服,但不超过抗倒塌限值。屋顶钢构件的抗拉抗压强度均没有超过限值。

5 结语

对于超限高层建筑,可以根据具体的设防烈度、场地条件、房屋高度、不规则的部位和程度,选择抗震性能目标,地震烈度较大的地区,抗震性能目标宜适当提高。宜进行弹塑性时程分析,以确定结构的薄弱部位,评判结构的薄弱程度。对薄弱部位,应采取有效的抗震加强措施。超限高层建筑的抗震设计,可参照本文的设计原则及设计要点进行设计。

致谢:本文的研究参考了泉州浦西万达广场超高层住宅超限高层建筑工程抗震设防审查报告、及南昌绿地中心广场超限高层建筑工程抗震设防审查报告,在此向两个项目的设计单位表示感谢。

参考文献

- [1] 建质[2010]109号. 超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点[S]. 住房和城乡建设部,2010年.
- [2] 徐培福. 复杂高层建筑设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [3] 林树枝. 超限高层建筑抗震设计及抗震审查[J]. 福建建筑,2005,5;6:189-19.
- [4] 黄志华,吕西林. 上海市超限高层建筑工程的若干问题研究[J]. 结构工程师,2007,10:1-4.
- [5] 徐培福,王亚勇,戴国莹. 关于超限高层建筑抗震设防审查的若干讨论[J]. 土木工程学报,2005,37(1):1-6.
- [6] 福建省建筑设计研究院. 泉州浦西万达广场超高层住宅超限高层建筑工程抗震设防审查报告[R]. 2010.9.
- [7] SOM, ECADI. Jiangxi Nanchang Greenland Central Plaza Seismic Design Review Report[R]. 2010.